热带湿季不同海拔林分的空气负离子特征及微气候效应*

司艳萍[1] 陈 俊[1] 曹凌仪[2] 何荣晓[1,3]

1 海南大学热带农林学院 海口 570228
2 海南大学生态与环境学院 海口 570228
3 热带特色林木花卉遗传与种质创新教育部重点实验室 海口 570228

摘要：为研究湿季不同林分空气负离子浓度的变化规律及其影响因素，选取三亚南岛森林康养基地同一海拔的 4 种林分类型和不同海拔梯度的常绿阔叶林、槟榔林为研究对象，采用空气负氧离子检测仪及气象记录仪在 7—9 月份进行数据监测，并对数据进行单因素方差分析、多重比较及相关性分析。结果表明：1）4 种林分空气负离子浓度日变化均呈双峰型，不同林分间存在极显著差异，其均值从高到低的排序为橡胶林>常绿阔叶林>槟榔林>母生林，群落结构越复杂、郁闭度越高，负离子变异性越小。2）受植物自身生理特性、群落结构等的影响，不同林分空气负离子浓度与微气候具有不同的线性相关关系。3）常绿阔叶林、槟榔林负离子浓度与海拔呈显著性负相关，槟榔林负离子浓度变异系数与海拔呈正相关。因此，4 种不同林分中，橡胶林的康养效果最佳，其次为常绿阔叶林，今后在森林康养旅游中，可优先选择这两种林分进行游憩。

关键词：森林康养；空气负离子；微气候；植物群落；植被类型
DOI：10.12169/zgcsly.2022.04.21.0001

Negative Air Ions Characteristics and Microclimate Effects of Forest Stands at Different Elevations in Tropical Wet Season

Si Yanping[1] Chen Jun[1] Cao Lingyi[2] He Rongxiao[1,3]

(1. College of Tropical Agriculture and Forestry, Hainan University, Haikou 570228, China; 2. College of Ecology and Environment, Hainan University, Haikou 570228, China; 3. Key Laboratory of Genetics and Germplasm Innovation of Tropical Special Forest Trees and Ornamental Plants, Ministry of Education, Haikou 570228, China)

Abstract: In order to study the changing pattern of negative air ion concentration at different stands in wet season and its influencing factors, 4 types of forest at the same altitude as well as evergreen broad-leaved forest and *Areca catechu* forest at different altitudes are selected in Nandao Forest-based Health Base, and the data about negative air ion are monitored from July to September using negative air ion detector and aerograph and analyzed with one-way ANOVA, multiple comparisons and correlation analysis. The results show that: 1) The diurnal variations of negative air ion concentration in the types of forest stand present a bimodal pattern, and there are extremely significant differences among different stands. The mean values are ranked from high to low as rubber plantation > evergreen broad-leaved forest > *A. catechu* forest > *Homalium hainanense* forest. The more complex the community structure and the higher the canopy

收稿日期：2022-04-21
* 基金项目：海南省自然科学基金（421QN200、421MS015）
第一作者：司艳萍（1994- ），女，硕士，研究方向为森林康养景观设计。E-mail：1074166395@qq.com
通信作者：何荣晓（1987- ），男，博士，讲师，研究方向为城市绿地生态景观规划。E-mail：rx.he@hainanu.edu.cn

density, the smaller the negative air ion variability; 2) Affected by the physiological characteristics and community structure of plants, the concentrations of negative air ions in different stands have different linear correlations with microclimate; and 3) The negative air ion concentrations in the evergreen broad-leaved forest and *A. catechu* forest are significantly negatively correlated with the altitude, and the variation coefficient of negative air ion concentration in *A. catechu* forest is positively correlated with the altitude. It can be seen that among the 4 types of forest stands, the rubber forest has the best effect in forest-based health and wellness, followed by the evergreen broad-leaved forest. Therefore, the two types of forests can be preferred for recreation activities to achieve forest-based health.

Keywords: forest therapy; negative air ion; microclimate; plant community; vegetation type

随着健康养生旅游的发展和人们康养意识的提高，森林环境在康养中发挥的重要作用成为当前研究的焦点。森林植被通过光合作用和尖端放电能够产生较高浓度的空气负离子，其复杂的植物群落结构改变了森林环境中的微气候，有利于空气负离子的存留[1-2]；林下土壤、岩石较为疏松，其中所含的放射性元素容易逸出进入空气，因此森林环境中具有较高的空气负离子含量。一定浓度的空气负离子具有康养功能，能够提高人体肺活量，促进人体新陈代谢和血液循环、增强人体免疫力等，被誉为“空气维生素和生长素”[3-4]。

目前，关于森林中空气负离子的相关研究主要侧重于不同的植被类型条件下空气负离子浓度的变化规律及其与气象因子的相关性[5-7]、空气负离子资源的应用与评价[8-9]，以及空气负离子在临床医学中的研究与应用[10]。研究发现，在不同的植被类型、海拔高度、地域环境中，空气负离子浓度日变化规律不同[11-15]，与温度、相对湿度等气候因子的相关性也存在差异[14,16-17]，其浓度的波动受许多因素的影响，并具有很强的变异性[18-19]。

国内对空气负离子的相关研究多集中在温带[17,20-21]、亚热带[13,22]，对热带森林中空气负离子与微气候的相关性研究较少。因此，本研究选取三亚南岛森林康养基地，通过对空气负离子浓度和气候因子的定位监测，观测不同林分环境内空气负离子浓度的日变化规律及变异特征，分析其与微气候因子、海拔高度的关系，为南岛森林康养规划建设和游憩时段设置提供参考依据。

1 研究区概况

南岛森林康养基地（以下简称南岛）位于海南省三亚市天涯区，2020 年被列为国家森林康养基地，属于热带海洋季风气候，海拔 200~600 m，年平均气温为 25.4 ℃，具有冬无严寒、夏无酷暑、长夏无冬、春秋相连的气候特点。年平均降雨量为 1 279.3~1 625.0 mm，夏季日照时间长，对植物生长极为有利。该地动植物资源丰富，是热带基因库最多的区域之一。

2 研究方法

2.1 样地选择

基地内以常绿阔叶混交林和纯林两种植物群落类型为主，纯林有橡胶、槟榔、母生林，在同一海拔梯度选择这 4 种典型林分，即常绿阔叶林（EB）、橡胶林（HB）、槟榔林（AC）、母生林（HH）进行研究，并设置无林地（NF）对照组作为观测点，林分基本情况如表 1 所示。

表 1 同一海拔高度 5 类样地概况

林分类型	主要树种	郁闭度	平均树高/m	群落结构	海拔/m
EB	黄桐木(*Endospermum chinense*)、小叶榕(*Ficus microcarpa*)、大叶相思(*Acacia auriculiformis*)、山油柑(*Acronychia pedunculata*)	0.78	23.50	乔木+灌木+草本	354
HB	橡胶树(*Hevea brasiliensis*)、猪肚木(*Canthium horridum*)	0.68	18.90	乔木+灌木+草本	357
AC	槟榔(*Areca catechu*)	0.22	12.76	乔木+草本	360
HH	母生(*Homalium hainanense*)	0.30	2.30	乔木+草本	346
NF	—	—	—	—	343

选择 3 个不同海拔高度（260、360、460 m）的常绿阔叶林、槟榔林分别设置观测点，3 个海拔的常绿阔叶林群落结构均是乔灌草，树种不完全重叠但主要树种相同，林分基本情况如表 2 所示。

表 2　不同海拔高度林分概况

海拔/m	林分类型	主要树种	郁闭度	平均树高/m	群落结构
260	EB	山楝(*Aphanamixis polystachya*)、橡胶树、黄桐木、鹅掌柴(*Schefflera octophylla*)	0.87	25.60	乔木+灌木+草本
260	AC	槟榔	0.18	13.95	乔木+草本
360	EB	山楝、橡胶树、黄桐木、大叶相思、小叶榕、山油柑	0.78	23.50	乔木+灌木+草本
360	AC	槟榔	0.22	12.76	乔木+草本
460	EB	山楝、苦楝(*Melia azedarach*)、黄桐木、大叶相思、小叶榕	0.76	24.35	乔木+灌木+草本
460	AC	槟榔	0.18	14.53	乔木+草本

2.2　指标测定方法

于 2021 年 7—9 月，每月均选择 15 d 晴朗的天气对观测点进行测量，监测时间为 9：00—18：00。采用 kec-900+智能空气负氧离子检测仪进行空气负离子的测量，每 0.5 h 记录一次，共测量 19 次，在相互垂直的 4 个方向分别测定（消除风向对数据的影响），测量频率为 15 s/次，每次待仪器稳定后连续读取数据 3 次，共 12 个数据，取 4 个方向的平均值作为这个时刻的浓度值。森林小气候采用 kestrel 5500 气象记录仪进行同步测量，测量频率为 15 s/次，连续读取数据 12 次，主要测量群落内的空气温度、相对湿度、风速。

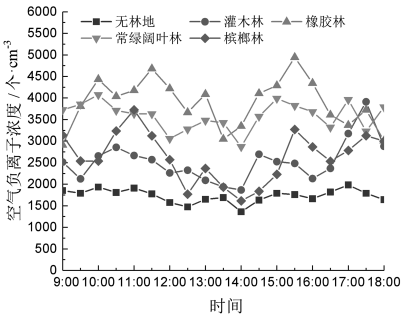
2.3　数据处理

运用 Excel 2016 进行数据统计，对小于等于前后值 3 倍或 1/3 异常值剔除处理，且将连续 6 个及以上的相同数据判定为异常值。用 Origin 2021 绘制图表。采用 SPSS 26.0 对空气负离子浓度数据进行 ANOVA 单因素方差分析与 Duncan 多重比较显著性检验，研究不同林分的空气负离子浓度差异。采用 Pearson 相关系数分析空气负离子与气象因子的相关性。

3　结果与分析

3.1　不同林分的空气负氧离子浓度

从图 1 可知，5 类样地日平均空气负离子浓度在1 713~3 885 个·cm^{-3}。4 种林分的空气负离子浓度随时间呈双峰型变化，但峰值出现的具体时间点略有差异，两次峰值均出现在 10：00—11：30、15：00—16：00。橡胶林、常绿阔叶林及槟榔林的日变化趋势具有较高相似性，随时间变化其空气负离子浓度浮动幅度较大，而无林地对照组空气负离子浓度浮动幅度较小，最低值出现在 14：00，达到了 1 360 个·cm^{-3}。

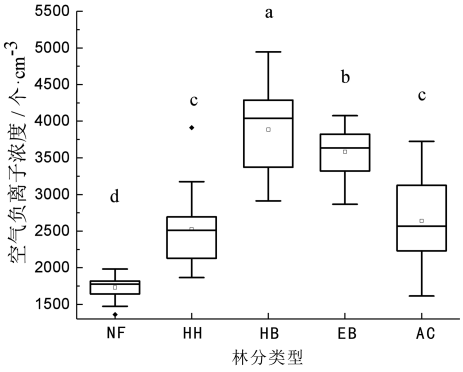


注：不同小写字母表示不同林分间差异性显著（$P<0.05$），下同。

图 1　不同林分的空气负离子浓度日变化特征

通过 ANOVA 方差分析（图 2）可知，不同林分的空气负离子浓度存在极显著差异（$P<0.01$）。5 类样地空气负离子浓度按平均值从高到低依次为橡胶林（3 885 个·cm^{-3}）>常绿阔叶林（3 584 个·cm^{-3}）>槟榔林（2 640 个·cm^{-3}）>母生林（2 527 个·cm^{-3}）>无林地（1 713 个·cm^{-3}）；而 4 种林分与对照组的变异系数从大到小依次为槟榔林（0.178）>橡胶林（0.138）>母生林（0.136）>常绿阔叶林（0.097）>无林地（0.087）。虽然常绿阔叶林空气负离子浓度低于橡胶林，但其变异性低、稳定性更强，这可能是因为南岛属于热带海洋季风气候，夏季易受台风天气的影响。研究表明，台风会导致林内产生风倒木、断枝和落叶问题，降低群落郁闭度，造成植物群落的组成结构发生明显变化[23]。常绿阔叶林作为南岛地带性顶级群落，与橡胶林相比，其物种丰富度高且种间关系更为稳定；槟榔林、母生林对负氧离子浓度影响并不显著，但槟榔林负离子变异性大于母生林，这可能是槟榔林平均树

高较高，空气负离子在迁移的过程中受环境因素影响较大。



注：图中的黑点表示异常值。

图 2 不同林分的空气负离子浓度差异

3.2 不同林分空气负离子浓度与气候因子的关系

对不同林分空气负离子浓度与空气温度、相对湿度、风速进行 Pearson 相关性分析（表 3）发现，不同林分具有不同的线性相关关系（图 3、图 4）。其中，橡胶林、常绿阔叶林及母生林空气负离子浓度与湿度呈显著性正相关；槟榔林、母生林空气负离子浓度与空气温度呈显著负相关；橡胶林空气负离子浓度与温度呈显著正相关；不同林分空气负离子浓度与风速均未达到显著相关水平。橡胶林空气负离子浓度与湿度呈显著正相关，这是因为橡胶林郁闭度良好，能够保持高湿状态，植物蒸腾作用减弱，气孔开放促进光合作用的产生，空气中的水分子参与 CO_3^-、OH^-、HCO_3^-等的离子反应，能够控制终端离子类型及其存在寿命[24]。槟榔林、母生林郁闭度较低，分析表明其空气温度与相对湿度呈显著性负相关，这是因为空气负离子的产生主要来源于植物光合作用以及尖端放电促进空气电离，当温度升高时，林下水分迅速被蒸发降低环境中的湿度，空气负离子浓度主要受温度影响，植物光合作用减弱从而降低空气负离子浓度。

表 3 不同林分空气负离子浓度与气象因子的相关性

林分类型	温度		相对湿度		风速	
	显著水平	相关系数	显著水平	相关系数	显著水平	相关系数
常绿阔叶林	0.453	−0.183	0.048	0.458 *	0.615	−0.123
橡胶林	0.013	0.559 *	0.006	0.638 **	0.900	0.031
槟榔林	0.001	−0.684 **	0.086	0.404	0.829	−0.053
母生林	0.021	−0.526 *	0.042	0.470 *	0.062	−0.436
无林地	0.112	−0.377	0.143	0.349	0.816	0.057

注：* 表示显著相关（$P<0.05$）；** 表示极显著相关（$P<0.01$），下同。

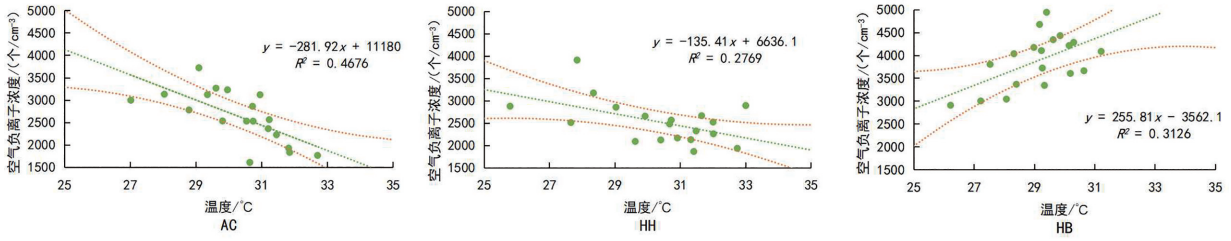


图 3 不同林分空气负离子浓度与温度的变化关系

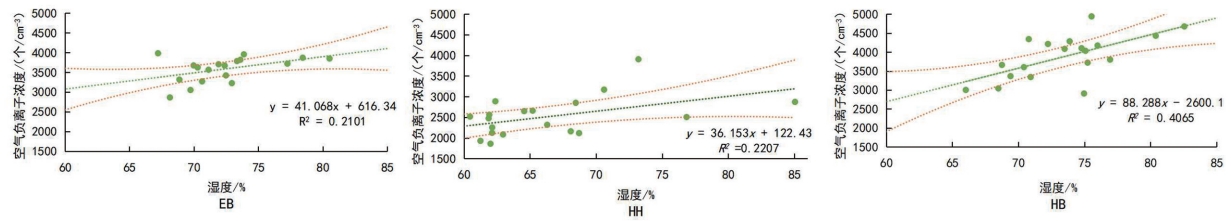


图 4 不同林分空气负离子浓度与湿度的变化关系

3.3 不同海拔林分的空气负离子浓度

常绿阔叶林、槟榔林在不同海拔梯度的空气负离子浓度日变化趋势如图 5、图 6 所示：常绿阔叶林在 260 m 和 360 m 的海拔高度上日变化趋势整体呈现双峰状，峰值均出现在 10：00—11：00 和 15：00—16：00，最低值分别出现在 12：00、

14：00，达到了 1 968 个·cm^{-3}；槟榔林在 260 m、360 m、460 m 的海拔高度上日变化趋势整体呈现双峰状，两次峰值均出现在 10：00—11：00、15：00—16：00，最低值出现在12：00—14：00，此时间段空气负离子波动较为平缓。

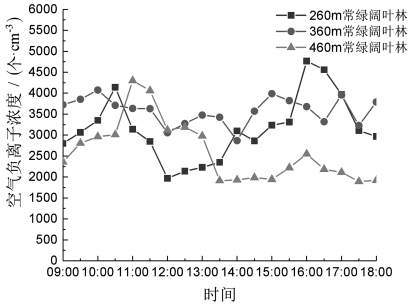


图 5　不同海拔常绿阔叶林空气负离子浓度变化特征

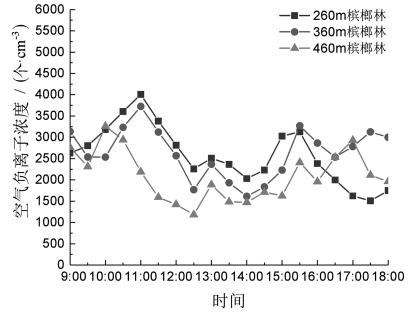
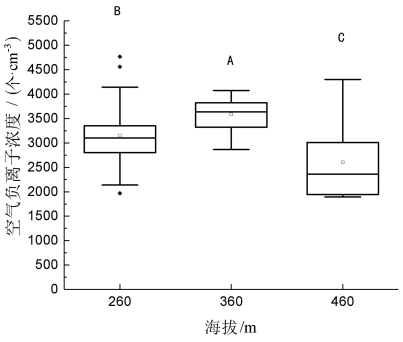


图 6　不同海拔槟榔林空气负离子浓度变化特征

通过 ANOVA 方差分析可知，不同海拔高度的常绿阔叶林存在极显著差异（$P<0.01$，图 7）、槟榔林空气负离子浓度存在显著差异（$P<0.05$，图 8）。在 260、360、460 m 海拔上常绿阔叶林空气负氧离子浓度平均值分别为 3 153、3 584、2 602 个·cm^{-3}，变异系数均值分别为 1.470、0.097、0.116；槟榔林空气负氧离子浓度平均值分别为 2 591、2 640、2 091 个·cm^{-3}，变异系数均值分别为 0.145、0.213、0.178。对不同海拔两种林分负离子浓度及变异系数与海拔高度进行相关性分析（表 4）发现：常绿阔叶林、槟榔林空气负离子浓度均与海拔呈显著负相关（$P<0.05$）；常绿阔叶林负离子浓度变异系数与海拔无显著相关性，而槟榔林负离子浓度变异系数则与海拔呈显著正相关。

表 4　不同林分空气负离子及其变异性与海拔相关性

林分类型	空气负离子浓度		空气负离子变异系数	
	显著水平	相关系数	显著水平	相关系数
常绿阔叶林	0.021	−0.305*	0.384	−0.121
槟榔林	0.018	−0.312*	0.046	0.273*



注：图中的黑点表示异常值。

图 7　不同海拔常绿阔叶林空气负离子浓度差异

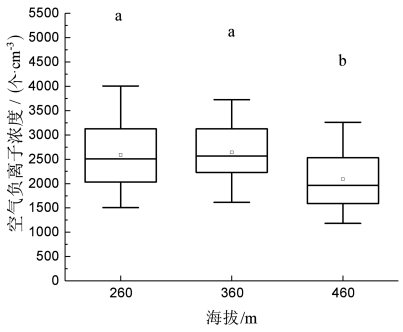


图 8　不同海拔槟榔林空气负离子浓度差异

4　讨论

4.1　空气负离子浓度的变化特征

对三亚南岛森林康养基地空气负离子的监测结果表明，在同一海拔梯度上的橡胶林、常绿阔叶林和母生林的负离子浓度日变化均呈双峰型，这与九龙山侧柏林[16]、崇礼区典型纯林[17]等空气负离子浓度在 10：00—12：00、16：00 左右出现峰值，13：00—14：00 到达低谷的研究结果相一致，但西径山森林公园林分内空气负离子浓度两次峰值出现在 9：00—10：00 和 13：00—14：00[5]。受植物自身生理特性（生长周期、林龄等）的影响，不同林分类型在中午出现波谷的时间点不同，这是因为不同植物光合作用达到最大值和光合午休现象出现的时间不同，植物进行光合作用产生的氧气在紫外线辐射下产生负氧离子，从而提升小区域内空气负离子的含量。

本研究结果表明，4 种林分的空气负离子浓度远远高于无林地，这也在之前诸多研究中得到证实[25]，这是因为森林环境中大面积覆盖的植被不仅能吸收空气中的污染物、净化空气环境，同

时植物也进行光合作用、尖端放电、光电效应产生空气负离子[26-27]。橡胶林、常绿阔叶林空气负离子浓度高于槟榔林、母生林，这可能与林分群落结构、郁闭度和植物叶面积指数相关，群落郁闭度越高[28]、群落叶面积指数越大，空气负离子浓度越高[29]。这也与刘端等[30]、王一荃等[1]指出结构复杂的植物群落负离子浓度高于结构简单的结论是一致的，即群落结构稳定，林分具有更强的产生空气负离子的能力。

4.2 微气候对空气负离子浓度的影响

空气负离子浓度与温度、相对湿度、风速的相关性目前尚未得出一致结论。在崇礼区典型林分[17]、九连山国家森林公园[31]以及嘉兴市 13 种林分[6]的研究中均表明，空气负离子浓度与温度成负相关，与相对湿度成正相关；而午潮山森林公园常绿阔叶林研究表明，空气负离子浓度与温度成正相关，与相对湿度成负相关[22]；在对北京西山国家森林国家公园[32]、江西大岗山[33]、千岛湖姥山林场[13]的研究中均认为，空气负离子浓度与气象因子的关系在不同的季节呈现出不同的相关性。这可能是因为研究对象所处地域不同，林分类型、海拔高度、植物自身生理特性、群落结构及外界环境因素干扰的结果。橡胶林空气负离子浓度主要受相对湿度的影响，而槟榔林、母生林郁闭度较低，空气温度与相对湿度呈极显著负相关，空气负离子浓度主要受温度的主导。这表明不同林分类型的群落结构及自身生理特性能够改变林内微气候[8]，导致不同林分空气负离子含量与气象因子相关性产生差异。

4.3 海拔对空气负离子浓度的影响

研究表明，不同海拔高度的常绿阔叶林、槟榔林与负离子浓度呈显著性负相关，这可能是因为随海拔的升高，林下土壤层增厚、岩石裸露减少，其中所含的放射性元素不易逸出进入空气进行电离[34]，林内风速增大、空气流动性增加，不利于空气负离子的存留；不同海拔槟榔林与变异系数分别呈显著性正相关，常绿阔叶林无显著相关性，即在林分郁闭度较低时，负离子浓度变异性随海拔升高而增强，这可能是因为槟榔林随海拔的升高林下通风效果更好、空气流通能力强，以此促进了空气负离子的迁移和碰撞，从而增加了变异性，且随海拔的升高，物种多样性指数降低，不仅群落结构稳定性易受热带台风气候的影响，植物受伤释放的芬多精等挥发性物质也能影响空气电离改变负离子浓度[8,35]。而常绿阔叶林郁闭度较高，林下环境因子变化幅度较小且空气流通性较弱。相较于环境因子，低海拔空气负离子浓度更易受人类活动的影响。

三亚南岛森林康养基地属于热带海洋季风气候，干湿季节分明，本研究仅选取了湿热季进行空气负离子浓度测量，后续可以对全年的空气负离子浓度进行持续监测，以获得全年空气负离子浓度的变化规律及与气候因子的关联关系，为基地的康养功能区划和季节性活动设置提供科学依据。

5 结论

采用 ANOVA 单因素方差分析与 Duncan 多重比较显著性检验的方法分析表明：4 种林分的空气负离子浓度存在极显著差异，其中，橡胶林空气负离子浓度最高，其次为常绿阔叶林，但橡胶林变异性高于常绿阔叶林，稳定性较弱；不同海拔高度的常绿阔叶林、槟榔林空气负离子浓度均在海拔 360 m 最高。因此，在今后南岛森林康养基地规划建设上，应重点保护性开发中高海拔橡胶林和常绿阔叶林的景观资源，合理利用其康养活动空间。

致谢：本研究得到了海南融盛置业有限公司和南岛森林康养基地相关领导和技术人员的大力支持，在此表示衷心的感谢。

参考文献

[1]王一荃,周璋,李意德,等.不同热带森林空气负离子浓度评价研究[J].生态环境学报,2021,30(5):898-906.

[2]WANG H,WANG B,NIU X,et al.Study on the change of negative air ion concentration and its influencing factors at differentspatio-temporal scales[J].Global Ecology and Conservation,2020,23:e01008.

[3]彭巍,李明文,王慧,等.空气负离子国内外研究进展及其在森林康养方面的积极作用综述[J].温带林业研究,2020,3(3):11-14,54.

[4]章志攀,俞益武,孟明浩,等.旅游环境中空气负离子的研究进展[J].浙江林学院学报,2006,23(1):103-108.

[5]高铭聪,蒋文伟,金竹秀,等.西径山森林公园夏季空气负离子日变化[J].浙江农林大学学报,2011,28(4):667-673.
[6]周斌,余树全,张超,等.不同树种林分对空气负离子浓度的影响[J].浙江农林大学学报,2011,28(2):200-206.
[7]刘宇,王晓立,董蓉,等.供暖季4种林地空气负离子浓度变化及其与主要影响因子的关系[J].江苏农业科学,2016,44(12):248-252.
[8]曾曙才,苏志尧,陈北光.我国森林空气负离子研究进展[J].南京林业大学学报(自然科学版),2006,30(5):107-111.
[9]邵海荣,贺庆棠.森林与空气负离子[J].世界林业研究,2000,13(5):19-23.
[10]马璨,楚医峰,殷晓轩.空气负离子临床应用与中医环境养生[J].中医药临床杂志,2016,28(5):628-630.
[11]冯鹏飞,于新文,张旭.北京地区不同植被类型空气负离子浓度及其影响因素分析[J].生态环境学报,2015,24(5):818-824.
[12]赵庆,钱万惠,唐洪辉,等.广东省云勇森林公园6种林分保健功能差异比较[J].浙江农林大学学报,2018,35(4):750-756.
[13]刘欣欣,华超,张明如,等.千岛湖姥山林场不同森林群落空气负离子浓度的比较[J].浙江农林大学学报,2012,29(3):366-373.
[14]司婷婷,罗艳菊,毕华,等.吊罗山热带雨林空气负离子含量变化特征初探[J].林业资源管理,2015(4):139-144.
[15]YAN X J,WANG H R,HOU Z Y,et al.Spatial analysis of the ecological effects of negative air ions in urban vegetated areas:a case study inMaiji, China [J]. Urban Forestry & Urban Greening,2015,14(3):636-645.
[16]余海,辛学兵,裴顺祥,等.九龙山林缘地区空气负离子浓度变化特征及与气象因素关系[J].生态科学,2018,37(6):191-198.
[17]赵怡宁,史常青,许荡飞,等.崇礼区典型林分空气负离子浓度及影响因素[J].林业科学研究,2018,31(3):127-135.
[18]LUO L H,SUN W,HAN Y J,et al.Importance evaluation based on random forest algorithms: insights into the relationship between negative air ions variability and environmental factors in urban green spaces[J].Atmosphere,2020,11(7):706.
[19]孙文,韩玉洁,殷杉.城市公园不同植物群落内空气负离子变异格局及影响因素[J].华东师范大学学报(自然科学版),2021(2):151-159.
[20]李少宁,王燕,张玉平,等.北京典型园林植物区空气负离子分布特征研究[J].北京林业大学学报,2010,32(1):130-135.
[21]关昶翔,许新宇,林双毅,等.福州国家森林公园空气负氧离子浓度变化特征与影响因素[J].中国城市林业,2022,20(6):79-84.
[22]马荣,王志高,黄玉洁,等.午潮山国家森林公园秋季空气负离子浓度及影响因素[J].森林与环境学报,2021,41(1):26-34.
[23]许涵,李意德,骆土寿,等.达维台风对海南尖峰岭热带山地雨林群落的影响[J].植物生态学报,2008,32(6):1323-1334.
[24]黄向华,王健,曾宏达,等.城市空气负离子浓度时空分布及其影响因素综述[J].应用生态学报,2013,24(6):1761-1768.
[25]王薇,陈明,夏斯涵.高密度城市住区绿地空气负离子浓度分布特征及其与微气候关系[J].生态环境学报,2020,29(7):1367-1376.
[26]吴楚材,郑群明,钟林生.森林游憩区空气负离子水平的研究[J].林业科学,2001,37(5):75-81.
[27]蒙晋佳,张燕.地面上的空气负离子主要来源于植物的尖端放电[J].环境科学与技术,2005,28(1):112-113,120.
[28]吴楚材,钟林生,刘晓明.马尾松纯林林分因子对空气负离子浓度影响的研究[J].中南林学院学报,1998,18(1):70-73.
[29]刘新,吴林豪,张浩,等.城市绿地植物群落空气负离子浓度及影响要素研究[J].复旦学报(自然科学版),2011,50(2):206-212.
[30]刘端,白志强,韩燕梁.喀纳斯国家级森林公园景区夏秋季空气负离子浓度变化特征[J].西北林学院学报,2015,30(3):253-257.
[31]彭琳玉,许方岳,王立夫,等.九连山国家森林公园负氧离子浓度时空变化及影响要素研究[J].西北林学院学报,2020,35(5):233-239.
[32]李少宁,李嫒,鲁绍伟,等.北京西山国家森林公园中空气负离子浓度与气象因子的相关性研究[J].生态环境学报,2021,30(3):541-547.
[33]张嘉昕,邹嘉南.江西大岗山负离子浓度与气象因子之间的响应关系[J].气象与减灾研究,2021,44(1):51-57.
[34]王淑娟,王芳,郭俊刚,等.森林空气负离子及其主要影响因子的研究进展[J].内蒙古农业大学学报(自然科学版),2008,29(1):243-247.
[35]刘开明,郑智,龚大洁.物种丰富度的垂直分布格局及其形成机制[J].生态学杂志,2017,36(2):541-554.